

## ОБРАБОТКА ДЕТАЛИЗИРУЮЩИХ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

И.В. МАНОНИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Россия

В статье предложен современный метод обработки данных рефлектометрических измерений линий связи, основанный на применении вейвлет-преобразования к рефлектограммам. Данный метод основан на многоуровневом одномерном дискретном вейвлет-разложении рефлектограммы до  $j$ -го уровня (глубины) и позволяет произвести декомпозицию рефлектограммы на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты, содержащие информацию с полезной и шумовой составляющими рефлектограммы. Шумовая составляющая рефлектограммы наиболее четко проявляется в коэффициентах детализации, полученных на самом низком уровне разложения ( $j = 1, 2, 3$ ), к которым необходимо применить пороговую обработку с различным значением порога для каждого коэффициента, таким образом, производится удаление достаточно маленьких коэффициентов, которые считаются шумом. После данной обработки коэффициентов детализации восстановленная рефлектограмма с высокой точностью соответствует рефлектограмме без шумовой составляющей, что позволит существенно уменьшить погрешность локализации повреждений и неоднородностей линий связи. Оценка полученных результатов проводится на основе сравнения среднеквадратической погрешности восстановленной, зашумленной и исходной рефлектограммы без шумовой составляющей, а также на основе визуального сравнения указанных рефлектограмм.

**Ключевые слова:** рефлектометрические измерения, вейвлет-преобразование, аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты, шумовая составляющая.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения работоспособности линий связи необходим постоянный контроль за их функционированием с оперативным обнаружением и последующим устранением различных неоднородностей и повреждений. Традиционными и распространенными измерениями на линиях связи являются рефлектометрические измерения, основанные на импульсном методе и реализованные в измерительных приборах – рефлектометрах, позволяющих дистанционно отслеживать и обнаруживать неисправности линий связи [1–3].

Перспективным подходом к измерению на линиях связи и обработке полученных результатов является применение вейвлет-преобразования к рефлектометрическим измерениям. Такое совместное использование для контроля параметров линий связи позволит повысить точность измерений.

### РАЗЛОЖЕНИЕ РЕФЛЕКТОГРАММЫ НА АППРОКСИМИРУЮЩИЕ И ДЕТАЛИЗИРУЮЩИЕ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТЫ

В исследуемом сигнале всегда присутствует шумовая составляющая. В качестве такого сигнала (рефлектограммы) рассматривается модель с некоррелированным гауссовским шумом  $\varepsilon$  с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma^2$ , для которой требуется построить оценку функции  $f$  по наблюдениям  $S_i$ .

$$S_i = f_i + \varepsilon_i, i = 1, \dots, N.$$

Решение поставленной задачи сводится к применению вейвлет-преобразования к результатам измерений с последующей пороговой обработкой вейвлет-коэффициентов. Такие методы относятся к более широкому классу методов разложения в ортогональные ряды.

На рис. 1, а представлена исходная рефлектограмма без шумовой составляющей, с которой необходимо производить сравнение. Для исследования взята рефлектограмма, полученная в результате измерений затухания регенерационного участка волоконно-оптической линии передачи Челябинск – Хабаровск. Число отсчетов равно  $2^{11} = 2048$ . Далее к исходной рефлектограмме добавлен шум со среднестатистической дисперсией линии связи  $\sigma^2 = 0,16^2$ . Такая рефлектограмма представлена на рис. 1, б.

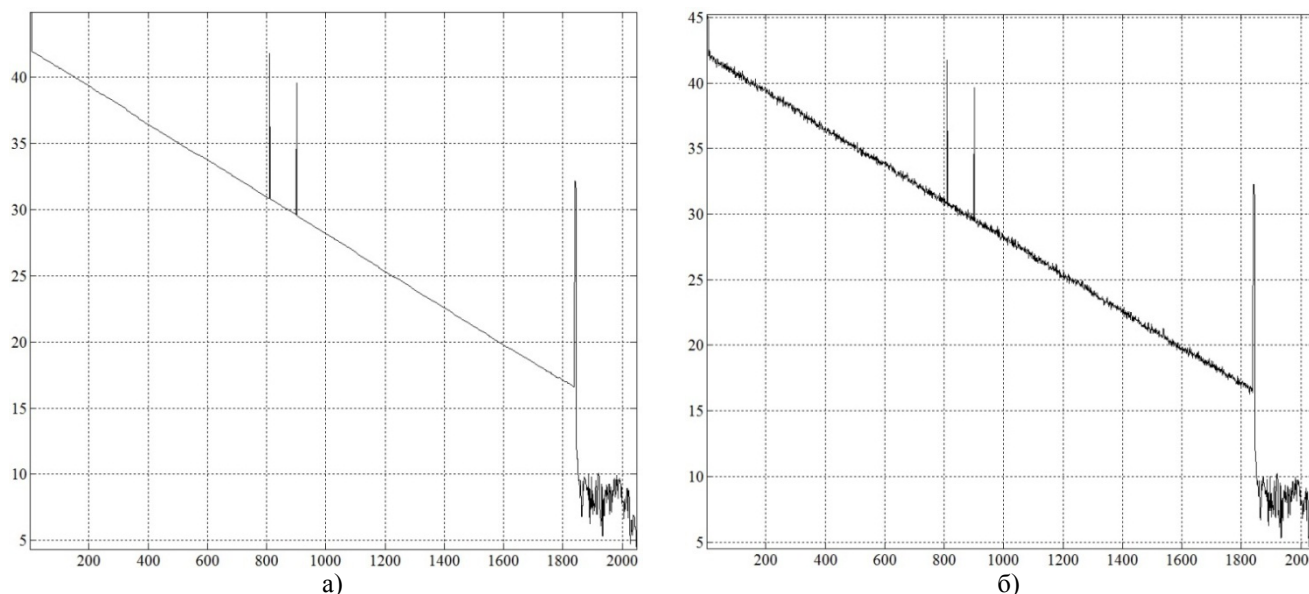


Рис. 1. Исходная рефлектограмма без шума (а); рефлектограмма с шумом (б)

Вейвлет-преобразование рефлектограммы описывает процесс прохождения исходного сигнала через фильтры нижних частот (Low) и верхних (High) (рис. 2), при этом коэффициенты аппроксимации представляют собой свертку исследуемой рефлектограммы с частотной характеристикой фильтра нижних частот (ФНЧ), а коэффициенты детализации – аналогичную свертку с частотной характеристикой фильтра высоких частот (ФВЧ) с последующей двоичной децимацией. Коэффициенты на втором уровне получаются в результате свертки полученных на первом этапе разложения коэффициентов аппроксимации также с ФНЧ и ФВЧ. На выходе фильтров формируются соответствующие последовательности аппроксимирующих ( $a_i$ ) и детализирующих ( $d_i$ ) вейвлет-коэффициентов. Аппроксимирующие низкочастотные коэффициенты соответствуют гладкой полезной составляющей  $f$  рефлектограммы. Шумовая составляющая отражается в высокочастотных детализирующих коэффициентах, поэтому дальнейшей пороговой обработке подвергаются именно они [4, 5, 9].

В общем виде разложение исследуемой рефлектограммы (2) до  $j$ -го уровня декомпозиции может быть представлено в виде кратномасштабного анализа как сумма следующих составляющих:

$$S(t) = A_j(t) + \sum_{m=1}^j D_m(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_{jk} \phi_{jk}(t) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{mk} \psi_{mk}(t),$$

где  $a_{jk} = (S(t), \phi_{jk}(t))$  и  $d_{mk} = (S(t), \psi_{mk}(t))$  – аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты, а базисные функции  $\phi$  и  $\psi$  соответственно равны:  $\phi(t) = 2 \sum_l L(l) \phi(2t-l)$ ,  $L(l) = (\phi(t), \phi(2t-l))$  и  $\psi(t) = 2 \sum_l H(l) \phi(2t-l)$ ,  $H(l) = (\psi(t), \phi(2t-l))$ ,  $l = 2n-1$ .

Последующая математическая обработка данных рефлектограммы осуществляется с помощью программно-математического аппарата *MATLAB*, обладающего мощной вычислительной и визуализирующей базой и позволяющего представлять данные для последующего их преобразования и обработки с помощью вейвлет-анализа.

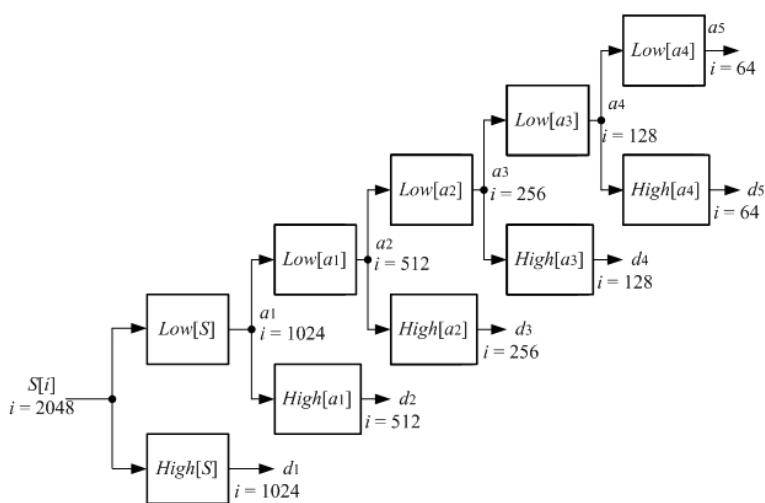


Рис. 2. Схема анализа рефлектограммы

до 5-го уровня. При этом основная информация о шуме содержится в коэффициентах детализации, полученных на самых мелких уровнях разложения ( $d_1, d_2, d_3$ ), а полезная составляющая рефлектограммы отображается в коэффициенте аппроксимации, полученном на первом уровне разложения ( $a_1$ ).

Дерево последовательного разложения рефлектограммы на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты для последующей фильтрации шума с помощью вейвлет-преобразования представлено на рис. 3.

В качестве функции для вейвлет-преобразования используется койфлет 1-го порядка, обладающий наиболее оптимальными свойствами для рефлектометрических измерений [6]. Разложение рефлектограммы производится

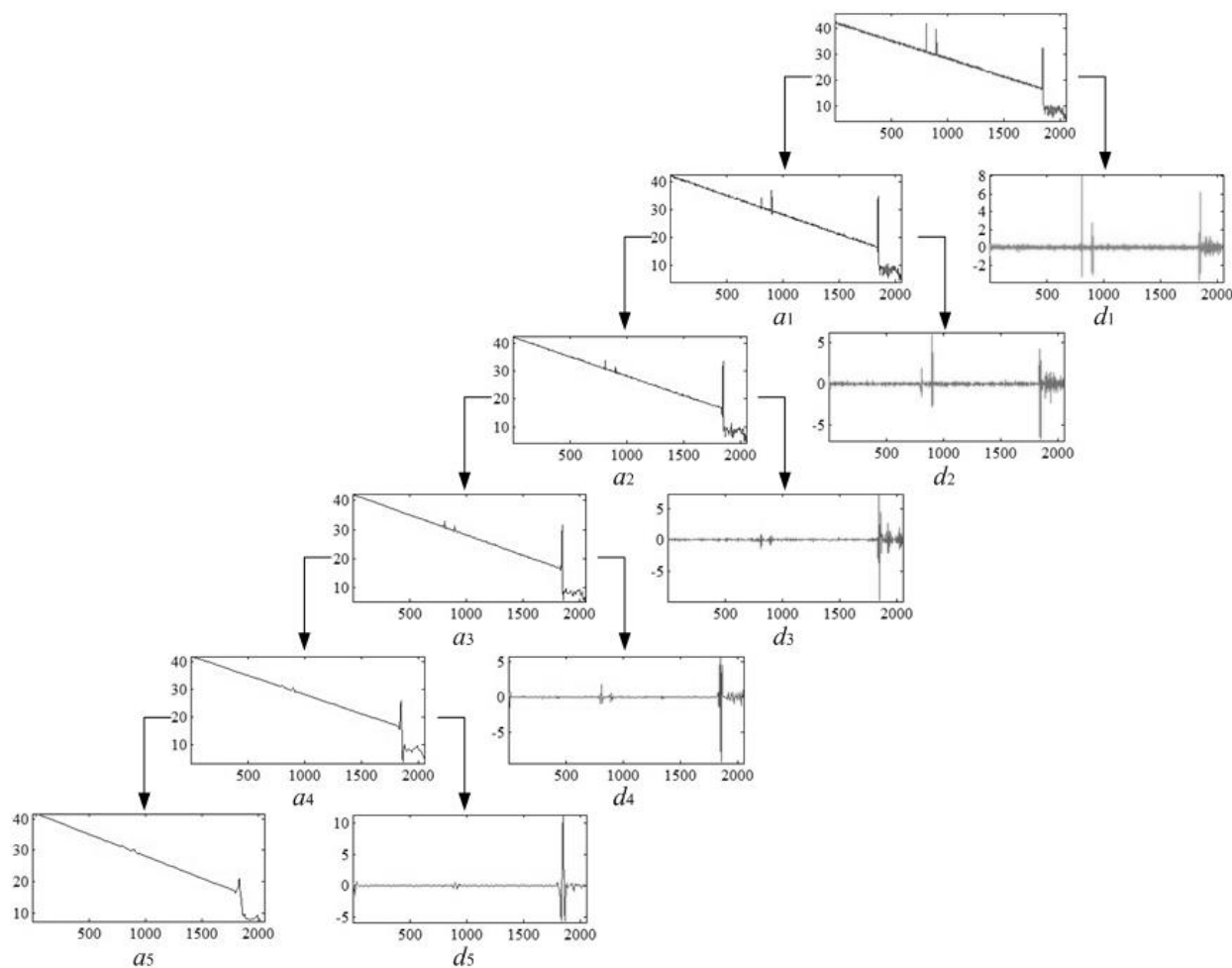


Рис. 3. Дерево последовательного разложения рефлектограммы

Последующей обработке подвергаются коэффициенты детализации, содержащие информацию о шумовой составляющей. А именно: необходимо для каждого уровня разложения провести корректировку коэффициентов, применяя пороговую обработку с универсальной функцией порога  $T_U = \sigma\sqrt{2\ln N}$ , зависящей только от дисперсии шума, и значением порога для каждого коэффициента. При выборе порога  $T_U$  из рефлектограммы убирается почти весь шум.

Смысл пороговой обработки детализирующих вейвлет-коэффициентов заключается в удалении достаточно маленьких коэффициентов, которые считаются шумом. При выборе жесткого типа пороговой обработки все вейвлет-коэффициенты меньше порогового значения обнуляются. Остальные коэффициенты остаются равны своему значению и используются при обратном вейвлет-преобразовании для восстановления рефлектограммы. При использовании мягкого типа пороговой обработки вейвлет-коэффициенты, которые по модулю меньше порога  $T$ , обнуляются, а абсолютные величины остальных коэффициентов уменьшаются на величину порога [7, 8, 10]. В работе [6] показано, что при обработке рефлектограммы лучших результатов можно достичь, используя жесткий порог. На рис. 4 представлены осциллограммы с пороговой обработкой детализирующих коэффициентов до 3-го уровня разложения.

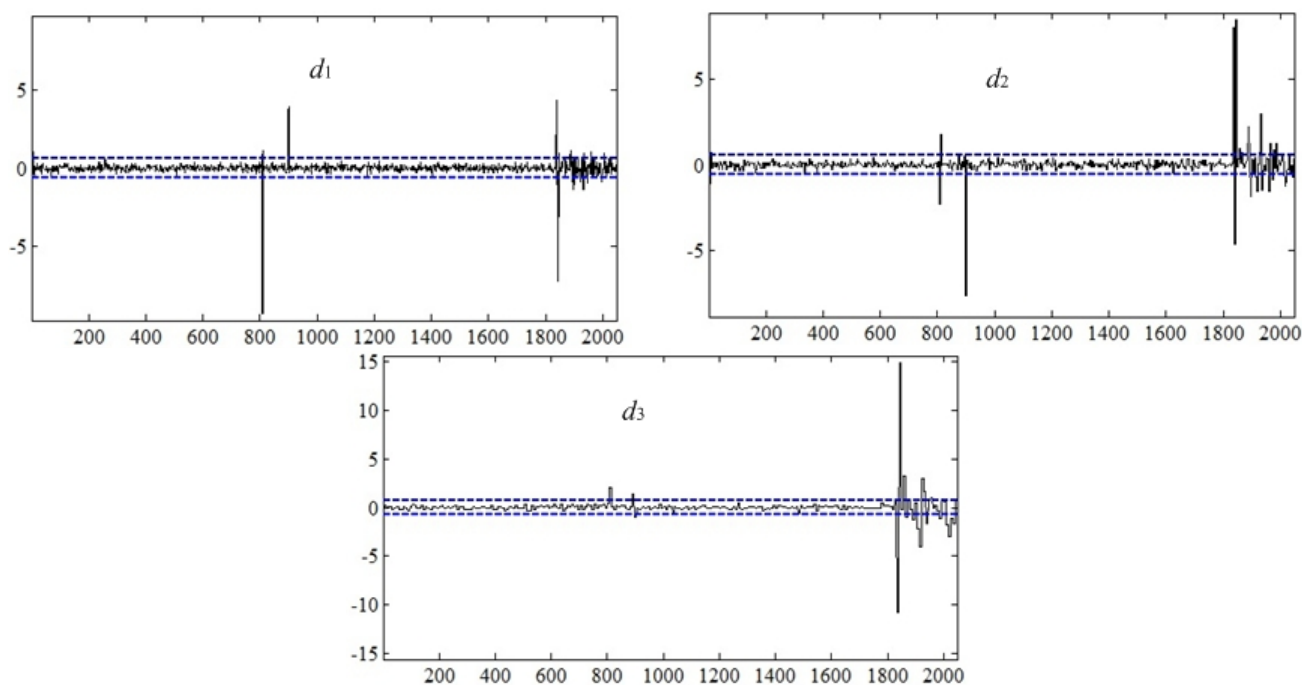


Рис. 4. Обработка детализирующих коэффициентов

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку результатов очистки рефлектограммы от шумовой составляющей необходимо провести по значениям среднеквадратической погрешности, рассчитанной для восстановленной рефлектограммы, а также зашумленной рефлектограммы относительно исходной рефлектограммы без шумовой составляющей. Для этого найдем среднеквадратическую погрешность, используя следующее выражение:

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \hat{a}_i)^2},$$

где  $a_i$  – значения рефлектограммы без шума;  $\hat{a}_i$  – значения восстановленной (зашумленной) рефлектограммы.

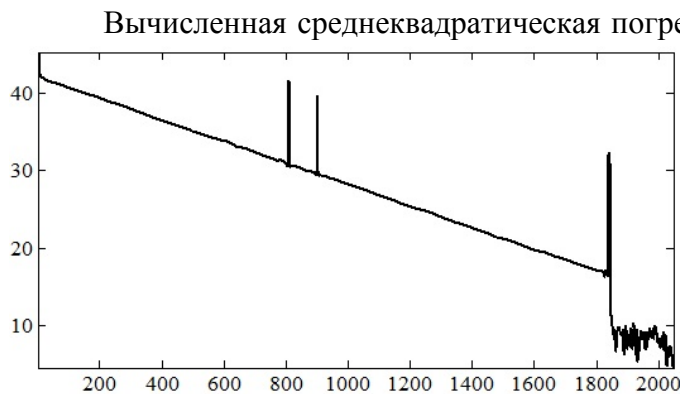


Рис.5. Результат очистки рефлектограммы от шумовой составляющей

имеет значение  $S_{X1} = 0,18$ . При этом среднеквадратическая погрешность для зашумленной рефлектограммы относительно исходной рефлектограммы без шума имеет значение  $S_{X2} = 1,71$ . На рис. 5 представлена восстановленная рефлектограмма после очистки от шумовой составляющей. Сравнивая полученные значения  $S_{X1}$  и  $S_{X2}$ , а также производя визуальное сравнение восстановленной (рис. 5) с исходной рефлектограммой без шума (рис. 1, а), можно сделать вывод, что очищенная рефлектограмма с высоким уровнем точности соответствует рефлектограмме без шума.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение вейвлет-преобразования для разложения рефлектограммы позволяет представить рефлектограмму в виде аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, содержащих в себе информацию о полезной и шумовой составляющих. При этом последующая пороговая обработка коэффициентов детализации позволяет уменьшить шумовую составляющую в рефлектограмме, а при дальнейшей реконструкции позволяет восстановить рефлектограмму с очень высокой точностью, что делает возможным локализовать повреждения и неоднородности с погрешностью, измеряемой несколькими сантиметрами на дальностях линий связи до нескольких сотен километров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цифровые сети связи. Кабельные и волоконно-оптические линии / И.И. Власов, Э.В. Новиков, М.М. Птичников, Н.Л. Сторожук. М.: ФАЗИС, 2008. 500 с.
2. **Иванов А.Б.** Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. 671 с.
3. **Скляр О.К.** Волоконно-оптические сети и системы связи. М.: Солон-Пресс, 2004. 272 с.
4. **Яковлев А.Н.** Введение в вейвлет-преобразования. Новосибирск: НГТУ, 2003. 104 с.
5. **Mallat S.** A wavelet tour of signal processing. Second Edition. Academic Press, 1999.
6. **Манонина И.В.** Определение оптимальных параметров для вейвлет-обработки рефлектограмм // Н&ES Research: Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2016. (в печати)
7. **Chang S.G., Yu B., Vetterli M.** Adaptive Wavelet Thresholding for image Denoising and Compression // IEEE Trans. Image Processing, 2000, Vol. 9, No. 9, pp. 1532–1546.
8. **Luisier F., Blu T., Unser M.** A new SURE approach to Image denoising: interscale orthonormal wavelet thresholding // IEEE transactions on image processing, 2007, Vol. 38, No. 5, pp. 1323–1342.
9. **Alsaidi M., Altaher, Mohd T., Ismail.** A Comparison of Some Thresholding Selection Methods for Wavelet Regression // World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, No. 62, pp. 119–125.
10. **Antoniadis A., Fryzlewicz P.** Parametric modelling of thresholds across scales in wavelet regression // Biometrika, 2006, Vol. 93, No. 2, pp. 465–471.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Манонина Ирина Владимировна**, старший преподаватель кафедры метрологии, стандартизации и измерений в инфокоммуникациях Московского технического университета связи и информатики, электронный адрес: [irina.mtuci@gmail.com](mailto:irina.mtuci@gmail.com).

## PROCESSING OF DETAIL WAVELET-COEFFICIENTS TO IMPROVE THE ACCURACY OF REFLECTOMETRY MEASUREMENTS

**Irina V. Manonina**

Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia,  
irina.mtuci@gmail.com

### ABSTRACT

In the article a modern data processing method of reflectometry measurement of communication line, based on the application of wavelet transform to reflectograms is claimed. This method is based on a multi-level one-dimensional discrete wavelet-decomposition of the reflectogram to the  $j$  level (depth) allowing decomposition of the reflectogram into approximation and detail coefficients, containing information on the useful and noise components of the reflectogram. The noise term of the reflectogram is most clearly revealed in the detail coefficients obtained at the lowest decomposition level ( $j = 1, 2, 3$ ), and which needs to be applied to the threshold processing with different threshold for each coefficient thus the removal of sufficiently small coefficients, which are considered to be noise, is carried out. After this processing of detail coefficients reconstructed reflectogram, with great accuracy, corresponds to the reflectogram without the noise term, that will significantly reduce the localization error of damage and discontinuity of communication line. Evaluation is carried out by comparing mean-square error of recovered, noisy, and original reflectogram without the noise component, as well as on the basis of visual comparison of these reflectograms.

**Key words:** reflectometry measurement, wavelet transform, approximation and detail coefficients, noise.

### REFERENCES

1. **Vlasov I.I., Novikov E.V., Ptichnikov M.M., Storozuk N.L.** Cifrovie seti svyazi. Kabelnie i volokonno-opticheskie linii [Digital network. cable and fiber-optic link]. Moscow, FAZIS, 2008, 500 p.
2. **Ivanov A.B.** Volokonnaya optika: komponenti, sistemi peredachi, izmereniya [Fiber optics: componentry, transmission system, instrumentation]. Moscow, Company SAIRUS SYSTEMS, 1999, 671 p.
3. **Sklyarov O.K.** Volokonno-opticheskie seti svyazi i sistemy svyazi [Fiber-optic network and communications system]. Moscow, Solon-Press, 2004, 272 p.
4. **Yakovlev A.N.** Vvedenie v veivlet-preobrazovaniya [Introduction to wavelet transform]. Novosibirsk: NGTU, 2003, 104 p.
5. **Mallat S.** A wavelet tour of signal processing, Second Edition. Academic Press, 1999.
6. **Manonina I.V.** Determination of the optimal parameters for wavelet-processing reflectograms. H&ES Research: High tech in Earth Space Research. 2016 (in the press). (in Russian)
7. **Chang S.G., Yu B., Vetterli M.** Adaptive Wavelet Thresholding for image Denoising and Compression. IEEE Trans. Image Processing, 2000, Vol. 9, No. 9, pp. 1532–1546.
8. **Luisier F., Blu T., Unser M.** A new SURE approach to Image denoising: interscale orthonormal wavelet thresholding. IEEE transactions on image processing, 2007, Vol. 38, No. 5, pp. 1323–1342.
9. **Alsaidi M. Altaher, Mohd T. Ismail.** A Comparison of Some Thresholding Selection Methods for Wavelet Regression. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, No. 62, pp. 119–125.
10. **Antoniadis A., Fryzlewicz P.** Parametric modelling of thresholds across scales in wavelet regression. Biometrika, 2006, Vol. 93, No. 2, pp. 465–471.